

光子晶体中双通道之间能量的转移*

冯志芳¹⁾ 王义全¹⁾ 许兴胜¹⁾ 江少林²⁾ 郝伟²⁾ 程丙英¹⁾ 张道中¹⁾

¹⁾中国科学院物理研究所凝聚态物理中心光物理实验室,北京 100080)

²⁾北京工业大学应用数理学院凝聚态物理,北京 100022)

(2003 年 4 月 11 日收到,2003 年 6 月 11 日收到修改稿)

从理论和实验上分析了光子晶体中双通道之间能量的转移.在双通道之间引入复合型光子晶体波导,通过调节复合型波导的内部参数,使其满足一定的条件,就可以实现双通道之间能量的完全转移,从而实现了光的定向传输.在实验中,测得了输出端的透过谱.

关键词:复合型光子晶体波导,能量转移,定向传输

PACC:4230,5110

1. 引言

自 1987 年 Yablonovitch 和 John 提出光子晶体这一概念以来^[1,2],光子晶体可以控制光传输的潜在能力激发了人们的研究兴趣.光子晶体中光子带隙^[3]的存在,使得光子晶体具有重要的应用价值,如可以制作无阈值激光器、光波导、波分复用器、集成光路等.为了有效地控制光子晶体中电磁波的传播,已经进行了大量的研究工作,特别是对于双通道之间能量的转移问题.双通道之间能量的转移对波分复用器、光滤波器都有很重要的意义.例如,1997 年 Little 等人^[3]从理论上证明了在邻近的双通道之间引入一个或多个环行腔就可以实现双通道之间能量的完全转换.环行腔作为共振元^[4-9],通过改变环行腔的大小,可以改变传输频率.1998 年 Fan 等人从理论上分析了光子晶体中实现双通道之间能量完全转移所需耦合元素的一般特征^[10,11].他们在两通道之间引入两个微腔来实现两连续通道之间能量的转移.通过改变微腔的参数,如腔的半径、介电常数等,就可以改变传输频率.

本文引入一种新的方法来实现双通道之间能量的转移.在邻近的双通道之间引入一个复合型光子晶体波导,复合型波导作为共振基元,通过调节复合型波导内部的参数,使其满足一定的条件,就可以实

现两波导之间能量的转移.当改变复合波导内部的参数,传输频率随之改变.这种结构光子晶体易于设计,可以用来设计制作光子晶体滤波器、光开关等,还可用于集成光路等方面.

2. 理论计算与实验结果

图 1 为实现双通道之间能量转移的原理图.我们引入了复合型波导,其中 AB , CD 和 EF 表示横向直波导, 1 , 2 , 3 表示的是纵向直波导,波导 1 , 2 和 2 , 3 之间的距离分别为 d 和 l (l 表示 t 与波导 AB 和 EF 之间距离的和), la 表示波导 1 的长度.阴影部分类似于方形腔.电磁波由波导 AB 的 A 端进入,方形腔与波导 AB 发生共振耦合,波导 AB 中的传输的波经波导 1 耦合进入方形腔传输.当 d 满足 $n\lambda + \frac{\lambda}{4}$ (n 是整数, λ 表示波长),就可以使由波导 2 , 3 进入波导 CD 的两束向 C 传输的波实现干涉相消,从而实现 C 端输出功率为 0.同时当 $t + la$ 满足 $m\lambda + \frac{\lambda}{4}$ (l , m 是整数, a 是所用晶体的晶格常数)或接近于这一条件时,波导 AB 中的透射波与经过波导 2 , 3 和 EF 的反射波实现干涉相消,使波导 AB 中 B 端的透射为 0.这样波只能从波导 CD 的 D 端输出,实现了能量由波导 AB 到波导 CD 的转移.

* 国家重点基础研究专项资金(批准号:2001CB6104)资助的课题.

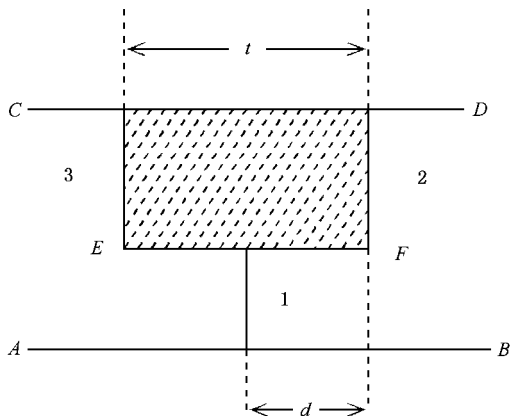


图1 原理图

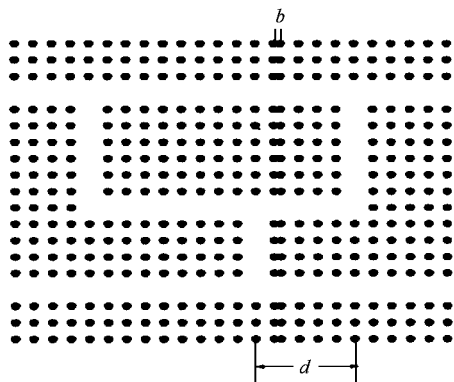


图2 光子晶体结构 实心圆表示介电常数为 8.4 的陶瓷柱子,其余部分为介电常数为 1.04 的聚合型泡沫材料(背景介质). b 的值为 $0.357a$. d 表示直波导 1 和 2 之间的距离

总之,在满足 $d = n\lambda + \frac{\lambda}{4}$ 和 $(t + la) = m\lambda + \frac{\lambda}{4}$

这一条件时,由波导 AB 端进入的波完全由波导 CD 的 D 端输出,波导 AB 的 B 端和波导 CD 的 C 端由于干涉相消,输出为 0,实现了光的定向传输,实现双通道之间能量的转移.

为了验证上述模型的正确性,我们设计了满足这些条件的光子晶体及复合型波导,如图 2 所示结构的双通道能量转移器的结构,并从理论和实验上验证了这一理论.由于 d 值有可能不是晶格常数的整数倍,故晶体是由两部分晶体组合而成^[12],这两个晶体的晶格常数,柱子半径,介电常数都相同,它们之间的距离为 b ,通过调节 b ,就可以得到合适的 d 值.而通过改变波导 AB 和 EF 之间柱子的层数,就可以得到合适的 $(t + la)$.这一结构中 d 和 t 是按照频率为 $0.37c/a$ 而选择设计的.当晶体的占空比为 9.6%,晶体的晶格常数为 a 时,方形晶体的第一带隙范围为 $0.32c/a - 0.47c/a$,其中 c 是光速.图 2 中,实心圆表示介电常数为 8.4 的陶瓷柱子,柱子半径为 $0.16a$,其余部分表示介电常数为 1.04 的聚合泡沫材料(背景介质),此晶体中 b 为 $0.357a$.我们用多重散射的方法模拟计算了这一晶体各输出端的能流.

我们用如图 3 所示的装置测得了 D 端的透过率.光子晶体置于一长 500mm,宽 380mm,高为 10mm 的波导散射室内,波导散射室的所有内表面抛光,以适应微波测量的要求.由于散射室内部的两侧在测量中存在散射,从而引起强烈的共振,影响测量精度,故两侧均用低密度的吸波材料覆盖,以便尽量减少散射.波导前后开口均与 3cm 波段的 H 形喇叭连接.H 形喇叭的长为 350mm,宽为 250mm;喇叭再与

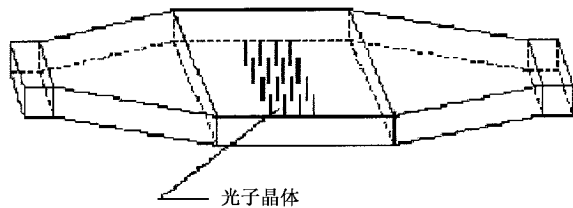


图3 实验装置

3cm 标准微波波导相连接.在以上微波测量单元中,测试采用了型号为 HP8510C 的标量网络分析仪.我们所用的微波实验的频率范围在 9GHz—15GHz 的波段内.由于实验条件的限制,我们只测定了 D 端的透过谱.在测量 D 端和 B 端的透过谱时,为了防止电磁波的散射,用吸波材料覆盖了其余部分,只留了 D 或 B 输出端(分两次测量).

对实验数据和理论计算结果进行归一化处理,得到了如图 4 所示的结果.图 4 中,实线和虚线分别表示 CD 波导中 D 端和 C 端的理论计算结果,点划线表示实验中测得的 D 端的透过率.从图 4 可以看出,理论计算中, D 端的输出透过率大于 C 端的透过率,在频率为 $0.37c/a$ 时,它们透过率的比是 40:1,实验结果比理论计算结果大 $0.008c/a$,这是由于理论计算所选参数与实验中所用的参数之间存在一定的误差,比如柱子半径,介电常数等.理论计算和实验中测得 B 端的透过率都很小,几乎为 0.我们还计算了频率为 $0.37c/a$ GHz 时这一晶体的电场分布,如图 5.由图 5 可以发现,波导 AB 中 B 端的透射和波导 CD 中 C 端输出为 0.这一结果与理论分析完全符合,从而从理论和实验上证明了用复合型

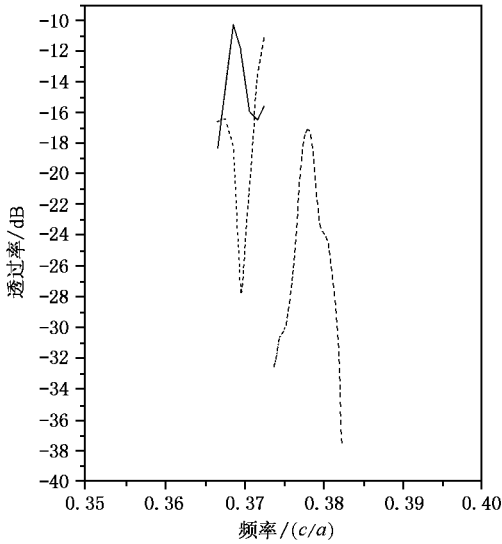


图4 理论计算结果和实验结果 实线表示理论计算得到的 D 端的输出能流, 虚线表示理论计算得到的 C 端的输出能流, 虚实线表示实验测得的结果

光子晶体波导来实现连续双通道之间能量转移的条件.

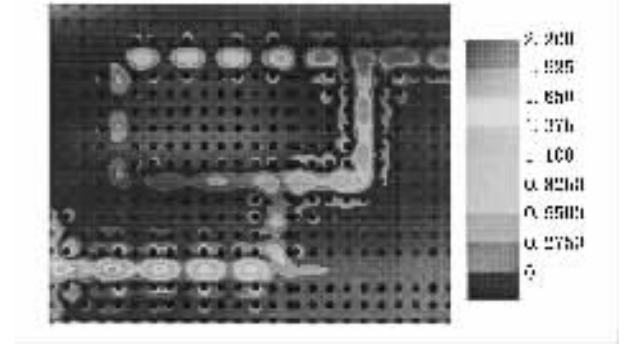


图5 电场分布图

3. 结 论

本文从理论和实验上证明了用复合型光子晶体波导来实现连续双通道之间能量转移的条件, 可以用这些条件设计各种光子晶体器件, 如滤波器, 光开关等.

我们非常感谢香港科技大学的张肇庆教授给我们的多重散射方法的程序, 感谢 CSTNET 为我们提供的计算时间.

- [1] Yablonovich E 1987 *Phys. Rev. Lett.* **58** 2059
- [2] John S 1987 *Phys. Rev. Lett.* **58** 2486
- [3] Little B E, Chu S T and Hau H A 1997 *J. Lightwave Technol.* **15** 0733
- [4] Urquhart P 1988 *J. Opt. Soc. Amer. A* **5** 803
- [5] Oda K, Tokato N and Toba H 1991 *J. Lightwave Tech.* **9** 728
- [6] Suzuki S, Oda K and Hibino Y 1995 *J. Lightwave Tech.* **13** 1766
- [7] Yanamoto Y and Slusher R E 1993 *Phys. Today* 66
- [8] Zhang Z, Chu D and Wu S 1995 *Phys. Rev. Lett.* **75** 2678
- [9] McCall S L, Levi A F J and Slusher R E 1992 *Appl. Phys. Lett.* **60** 289
- [10] Fan S H, Villeneuve P R, Joannopoulos J D and Haus H A 1998 *Optics Express* **3** 4
- [11] Fan S H, Villeneuve P R, Joannopoulos J D and Haus H A 1998 *Phys. Rev. Lett.* **80** 960
- [12] Lin L L and Li Z Y 2001 *Phys. Rev. B* **63** 033310
- [13] Qiu G X *et al* 2003 *Acta Phys. Sin.* **52** 600 [in Chinese] 仇高新等 2003 物理学报 **52** 600]

Energy transfer between two continuous channels in photonic crystals *

Feng Zhi-Fang¹⁾ Wang Yi-Quan¹⁾ Xu Xing-Sheng¹⁾ Jiang Shao-Lin²⁾ Hao Wei²⁾
Cheng Bing-Ying¹⁾ Zhang Dao-Zhong¹⁾

¹⁾(*Optical Physics Laboratory , Institute of Physics and Centre for Condensed Matter Physics ,Chinese Academy of Sciences , Beijing 100080 , China*)

²⁾(*College of Applied Science , Beijing University of Technology ,Beijing 100022 , China*)

(Received 11 April 2003 ; revised manuscript received 11 June 2003)

Abstract

In this letter energy transfer between continuous channels is analysed both theoretically and experimentally. Energy transference has been realized by changing the parameters of combined wave-guides. In the experiment , we have also measured the transmission spectrum.

Keywords : combined wave-guide , energy transfer , directed propagation

PACC : 4230 , 5110

* Project supported by the Special Foundation for State Major Basic Research Program of China (Grant No. 2001CB6104).